Conversion d'énergie de type alternatif/continu

Introduction au redressement monophasé non commandé

«La puissance ne consiste pas à frapper fort ou souvent, mais à frapper juste. »
Honoré de Balzac in « Physiologie du mariage » .

Résumé

Les **besoins des récepteurs électriques** nécessitent **d'adapter la forme de l'énergie** fournie par le **réseau de distribution**. C'est le rôle des **modulateurs d'énergie**. Or les réseaux et les récepteurs électriques absorbe de l'énergie sous deux formes, en continus ou en alternatifs. Pour adapter l'offre à la demande quatre types de convertisseurs sont nécessaires. Parmi ceux-ci, ce document aborde la **conversion alternatif-continu** au sein de **redresseurs** dont l'étude est limitée aux ensembles **non commandés**.

La chaîne de conversion peut se décomposer en trois parties : la **source alternative**, le **commutateur** et enfin la **charge**. L'étude de chacune de ces fonctions permet de juger de leur influence sur l'efficacité globale du redresseur.

L'étude d'une **structure élémentaire** débitant sur une charge résistive permet de définir la tension moyenne, le courant moyen, la puissance moyenne, la puissance apparente et le facteur de puissance. Ce dernier est plutôt médiocre dans ce premier exemple. L'étude se poursuit alors en faisant **évoluer** la charge vers un **récepteur inductif** plus proche des charges industrielles. Dans ces conditions, le courant ne s'annule qu'après la tension, forçant la conduction du commutateur pour laisser apparaître une tension négative aux bornes de la charge. Pour compléter cet aspect, on traite le cas d'une charge comportant une f.e.m. en série (comme dans les moteurs à courant continu). L'étape suivante permet d'améliorer le facteur de puissance, le **commutateur évolue** par **l'insertion d'une diode de roue libre** pour assurer la continuité du courant dans la charge inductive lors d'une conduction continue. Ces considérations permettent de mettre en place une modélisation de la charge par une source de courant. Dernier aspect, la source est modifiée par **l'emploi d'un transformateur** pour assurer un facteur de puissance proche de 1, garant d'une grande qualité du comportement harmonique de l'ensemble {redresseur + charge}.

Sommaire

I. Introduction 2
I.1. Nécessité de la conversion d'énergie 2
I.2. Organisation d'un convertisseur alternatif/continu 2
II. Cadre des études — Hypothèses 2
III. Introduction au redressement monophasé : cas élémentaire 3
III.1. Structure 3
III.2. Étude 3
III.3. Les éléments d'étude des redresseurs 4
IV. Modification de la nature de la charge 4
IV.1. Structure 4
IV.2. Étude 5
V. Adaptation du commutateur 6
V.1. Structure 6
V.2. Étude 6
VI. Amélioration de la source 7
VI.1. Structure 7
VI.2. Étude 8
VII. Perspectives 10

I. Introduction

I.1. Nécessité de la conversion d'énergie

Les réseaux électriques industriels alimentent les actionneurs en énergie suivant leur nature. Cette énergie électrique apparaît essentiellement sous deux formes : **alternative** (tensions ou courants sinusoïdaux à *valeur moyenne nulle*) ou **continue**.

Suivant le type d'actionneur, il est nécessaire d'adapter la forme de l'énergie fournie par le réseau. Les différentes possibilités apparaissent à la *Figure 1*.

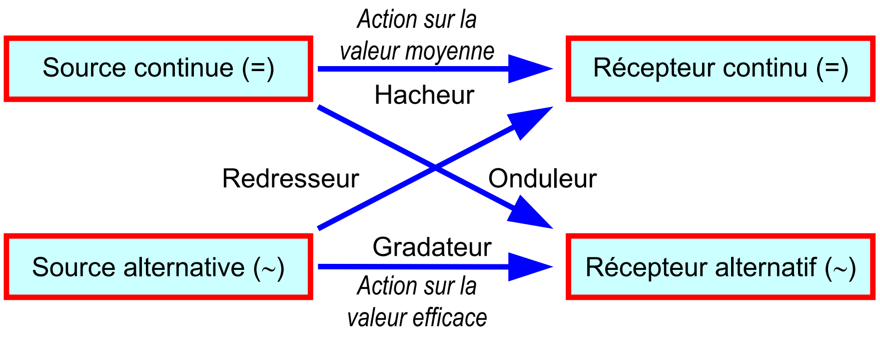

Figure 1 : les sources et les récepteurs alimentés par les différents convertisseurs d'énergie.

Pour traiter la première fonction, ce document n'aborde que la conversion d'énergie du type alternatif/continu au travers des redresseurs monophasés délivrant une tension moyenne constante dans le cas de différentes charges industrielles.

I.2. Organisation d'un convertisseur alternatif/continu

L'élément clef de notre étude est le convertisseur. Mais ce redresseur ne peut être dissocié du récepteur qu'il alimente. De la même manière l'ensemble {convertisseur + récepteur} constitue la charge de la source électrique d'où provient l'énergie, c'est-à-dire le réseau d'alimentation. L'ensemble constitue une **chaîne de conversion** dont chacun des **éléments** ne peut être **étudié** qu'en **tenant compte des autres**.

Sur la base de ces éléments, on peut considérer que la chaîne de conversion alternative/continue se décompose suivant la structure représentée à la *Figure 2*.

Figure 2 : la chaîne de conversion alternatif/continu.

On tiendra toujours compte d'une source de tension sinusoïdale. Pour adapter les niveaux de tension, un transformateur peut être placé en tête de la chaîne de conversion. Le récepteur est une charge électrique qui peut comprendre une résistance (ex : chauffage industriel) ou un circuit *RL* voire *RLE* (machine à courant continu). Parfois, la charge est elle-même un convertisseur adaptant l'énergie continue pour alimenter un onduleur par exemple. Le redresseur intermédiaire est chargé de rendre la tension unidirectionnelle tandis que le courant est imposé par la charge.

II. Cadre des études — Hypothèses

Les semi-conducteurs employés, et en particulier les diodes, sont supposés parfaits : tension de seuil, résistance dynamique en direct et courant inverse nuls.

III. Introduction au redressement monophasé : cas élémentaire

III.1. Structure

On envisage une structure comportant une **source sinusoïdale** et une **diode** pour alimenter une **charge résistive**. On distingue les trois blocs précédemment définis : une source, un commutateur et la charge (Figure 3).

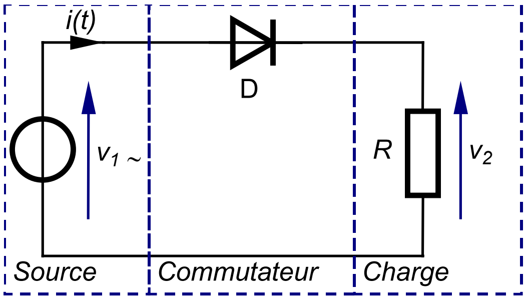

Figure 3 : premier exemple de structure de redresseur.

III.2. Étude

L'étude du montage conduit à discuter l'existence du courant *i*(*t*) dans la charge en fonction de l'état de la diode. La tension n'apparaît aux bornes de la charge que si la tension de la source est positive entraînant une tension positive en sortie. Dès que la tension réseau est négative, la diode est bloquée : la tension aux bornes de la charge et le courant sont nuls.

Ce fonctionnement est illustré par les chronogrammes de la *Figure* 4.

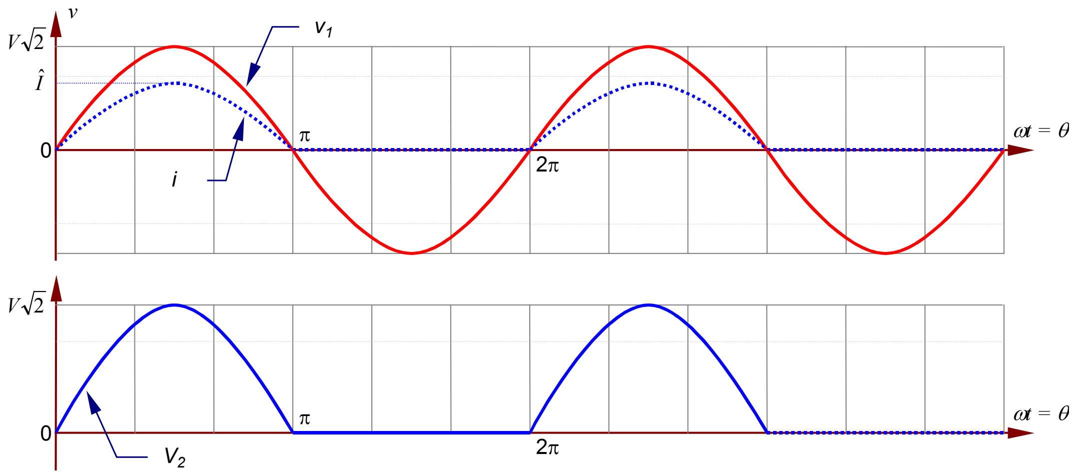

Figure 4 : chronogrammes des tensions d'entrée et de sortie et du courant.

Tension et courant moyens

Les valeurs moyennes de la tension aux bornes de la charge et du courant sont :

$$< v_2(t) >= V_0 = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \qquad < i(t) >= I_0 = \frac{V\sqrt{2}}{\pi R}$$

Puissance

La puissance instantanée est $p(\theta) = \frac{2V^2}{R}\sin^2\theta$ de 0 à π puis nulle ensuite.

La puissance moyenne est alors : $< p(\theta) >= P = \frac{V^2}{2R}$

$$\text{Attention !!} \quad P \neq V_0 I_0 = \frac{2V^2}{\pi^2 R}$$

Tension et courant efficaces

Le courant efficace est porté par la puissance moyenne, donc $I_{eff} = \dfrac{V}{\sqrt{2}R}$

Facteur de puissance

Le facteur de puissance k est le rapport de la puissance active (moyenne) à la puissance apparente.

Vu de la source : $P = < p(t) >$, $S = V \cdot I_{eff}$ donc $k = \dfrac{P}{S} = \dfrac{1}{\sqrt{2}} \approx 0{,}71$

Conclusion

Ce dispositif rudimentaire assure l'augmentation de la tension moyenne puisqu'elle n'est plus nulle. Il demande à être amélioré afin d'atteindre une valeur proche de la tension crête avec un facteur de puissance bien meilleur que 0,71.

Cet objectif pourra être atteint en adaptant tantôt la source, le commutateur ou la charge ou plusieurs d'entre–eux.

III.3. Les éléments d'étude des redresseurs

En observant les différents résultats de la partie précédente, de l'étude d'un redresseur, on peut dégager les informations suivantes :

- la tension et le courant moyens du côté de la charge (à partir des formes d'ondes) ;
- la puissance moyenne délivrée à la charge ;
- Les contraintes imposées aux commutateurs (à partir de l'étude des formes d'ondes) ;
- le comportement global en puissance du redresseur (l'efficacité) par l'étude du facteur de puissance.

Mais au-delà de ces considérations et comme cela a été mentionné précédemment, cette conversion d'énergie est influencée par la nature de la charge, du commutateur ou de la source. L'exemple précédent va progressivement être modifié pour mettre en évidence les différentes propriétés.

IV. Modification de la nature de la charge

IV.1. Structure

En électrotechnique les charges sont souvent combinées : inductive et résistive. Les électroaimants ou les machines à courant continu en sont des exemples. Le schéma permettant la nouvelle étude est celui de la *Figure 5*.

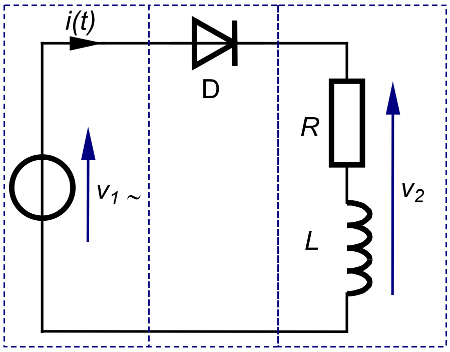

Figure 5 : évolution vers une charge inductive.

IV.2. Étude

La diode conduit dès que la tension v_1 est positive si bien que la tension v_2 reste identique à v_1. Pour le courant $i(t)$, on assiste à un régime transitoire régit par l'équation différentielle suivante :

$$L\frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = v_2(t) = V\sqrt{2}\sin\omega t\ .$$

Pour des raisons de commodité, on effectue le changement de variable $\theta = \omega t$, ce qui conduit à :

$$L\omega\frac{di(\theta)}{d\theta} + Ri(\theta) = V\sqrt{2}\sin\theta$$

La résolution (dont le détail n'est pas présenté) conduit à :

$$i(\theta) = \frac{V\sqrt{2}}{R}\cos\varphi.(\sin\varphi.e^{-\frac{\theta}{\tan\varphi}} + \sin(\theta - \varphi)) \text{ avec } \tan\varphi = \frac{L\omega}{R}$$

On remarque la superposition du régime transitoire (terme exponentiel) et du régime permanent faisant apparaître le déphasage φ du courant sur la tension.

Le courant ne s'annule pas pour $\theta = \pi$, mais un peu au-delà en θ_0. La diode est alors en conduction forcée si bien que la tension v_2 devient négative jusqu'à l'annulation de i.

Ces déterminations permettent les tracés de la *Figure 6*.

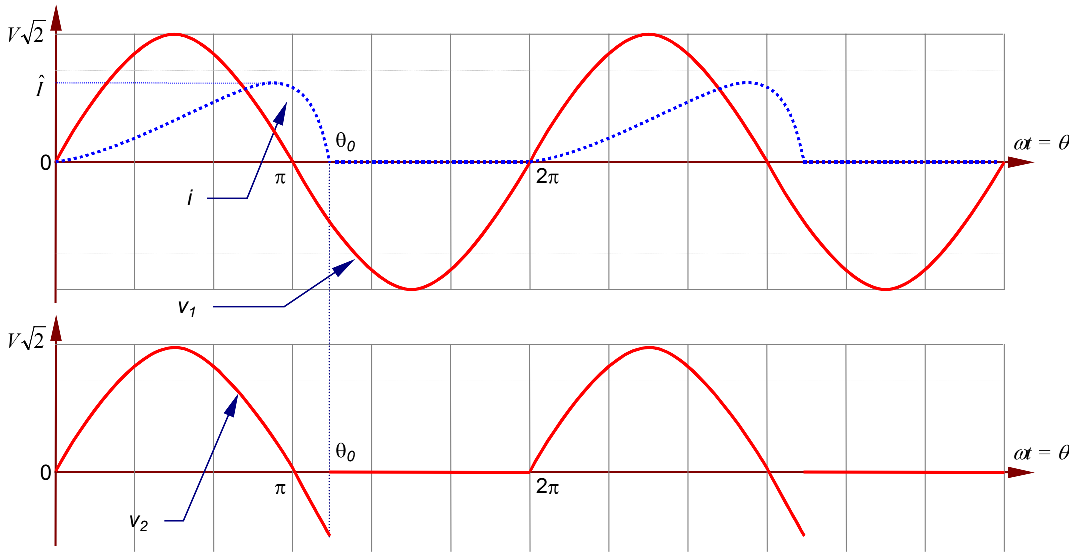

Figure 6 : chronogrammes des tensions et du courant pour une charge RL.

De cette étude, on peut immédiatement envisager le comportement des grandeurs si la charge est complétée par une force contre-électromotrice (celle d'une MCC par exemple) symbolisée par une source de tension E en série avec les autres éléments.

Dans ces conditions la conduction de la diode **D** n'apparaît qu'une fois que la tension de cathode est supérieure à celle de l'anode, c'est à dire $v_1(t) \geq E$. Cette condition correspond aux angles θ_a d'allumage et θ_e d'extinction. Le courant respecte les mêmes règles d'existence précédentes : croissance dès θ_a et annulation au-delà de θ_e en θ_0. C'est entre ces deux angles que la diode est en conduction forcée qui se traduit par l'apparition d'une portion négative de la tension v_2 (*Figure 7*).

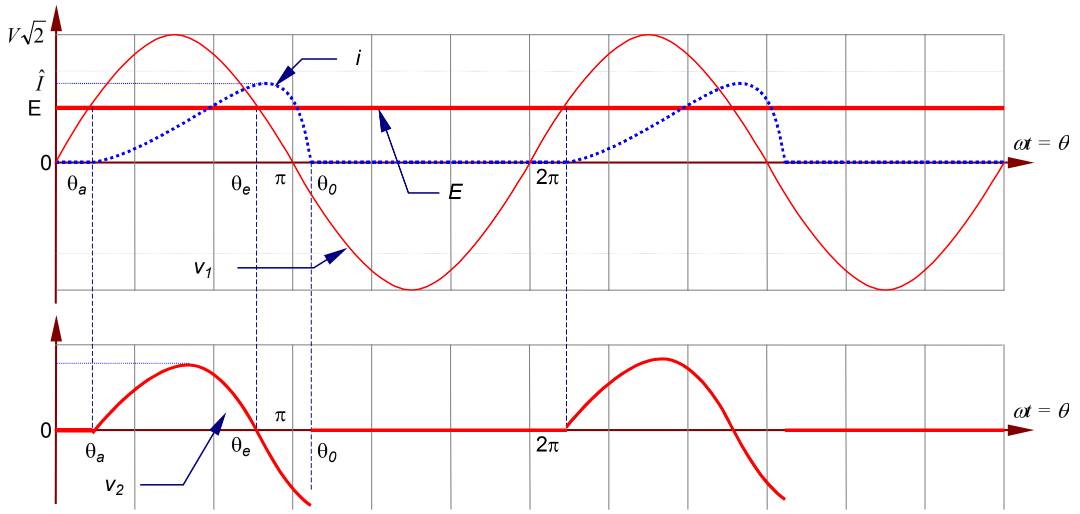

Figure 7 : chronogrammes des tensions et du courant pour une charge RLE.

V. Adaptation du commutateur

V.1. Structure

Après la charge, on peut s'interroger sur le moyen de modifier le commutateur de manière à éviter l'influence de la charge sur la tension (toujours dans le cas d'une charge inductive).

La nouvelle structure (*Figure 8*) assure une phase de roue-libre qui s'inspire de démagnétisation du circuit magnétique d'un transformateur en régime impulsionnels, d'un enroulement de moteur pas à pas ou les bobines de relais à courant continu.

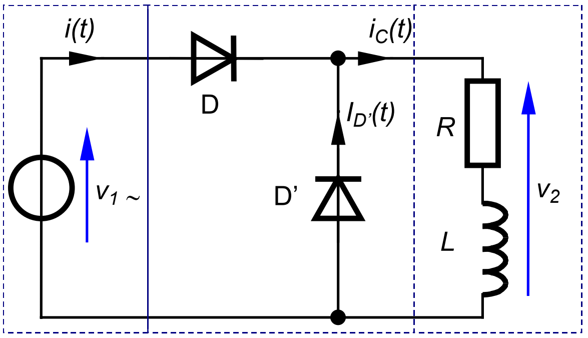

Figure 8 : insertion d'une diode de roue libre.

V.2. Étude

Durant l'alternance positive de la tension v_1, la diode **D** est passante, si bien que **D'** est bloquée. Le comportement du montage est connu (§IV). Dès que v_1 s'annule la diode **D** peut se bloquer car la diode **D'** prend le relais de la conduction du courant i_C dans la charge. **D'** conduisant, la tension à ses bornes v_2 est nulle. L'énergie emmagasinée dans l'inductance est dissipée dans la résistance *R* et le courant i_C décroît pour s'annuler en θ_0. L'annulation du courant caractérise un fonctionnement en **conduction discontinue**. Si l'énergie est suffisante, le courant ne s'annule pas, c'est la **conduction continue** . Les chronogrammes de la *Figure 6* illustrent ce fonctionnement.

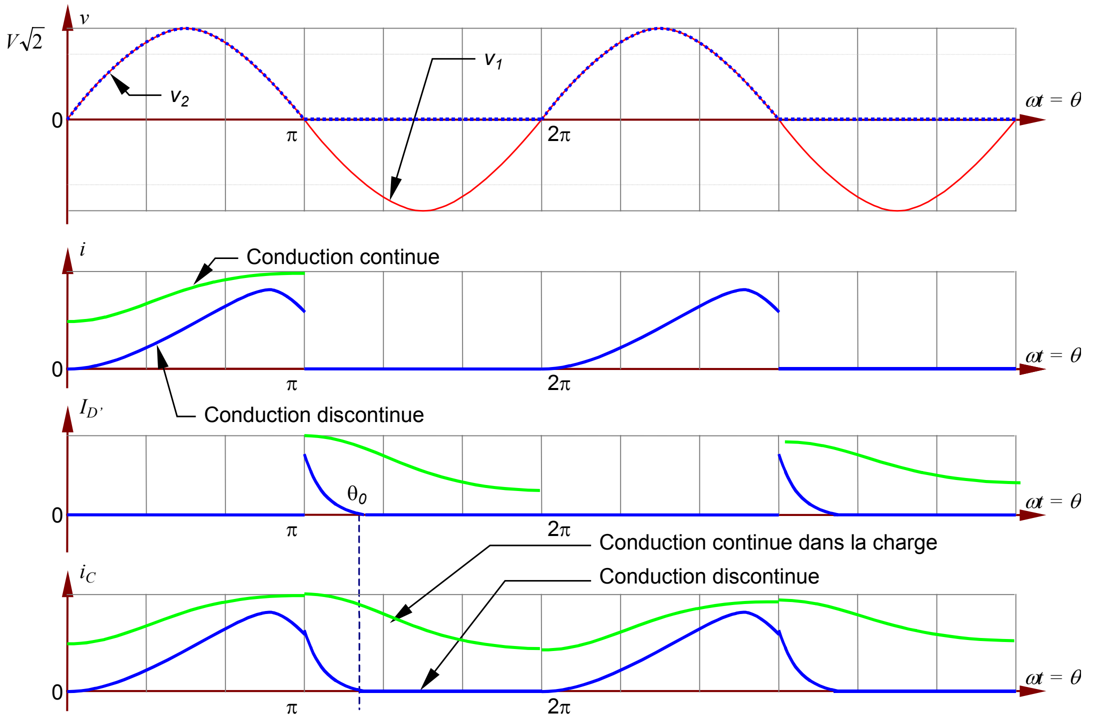

Figure 9 : chronogrammes des tensions et des courants pour une charge RL.

Pour idéaliser l'influence des éléments, la constante de temps τ (= L/R) de la charge est comparée à la période T de la tension v_1. Si $\tau >> T$, le courant i_C reflète une conduction continue assimilable à des segments de droite comme l'indique la *Figure 10*. Dans un cas extrême, les courants I_{min} et I_{max} sont confondus avec le courant moyen I_0. Le récepteur est équivalent à une source de courant I_0. Cette dernière forme est utilisée par la suite car elle est souvent recherchée.

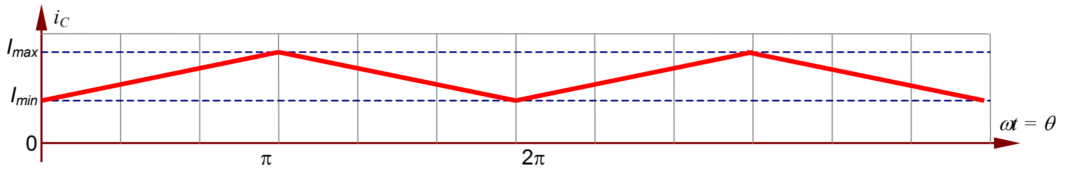

Figure 10 : conduction continue idéalisée sur charge inductive à forte constante de temps.

VI. Amélioration de la source

VI.1. Structure

Dans la poursuite des modifications significatives des éléments de la chaîne de conversion, la dernière étape concerne la source. En multipliant le nombre de phases et en les combinants, on obtient aisément une augmentation de la valeur moyenne de la tension. En monophasé, on ne dispose que d'une seule phase. Une pseudo-phase est créée grâce à un transformateur à deux secondaires (transformateur à point milieu). La source biphasée qui en résulte délivre des tensions en opposition de phase.

La nouvelle structure est présentée à *Figure 11*.

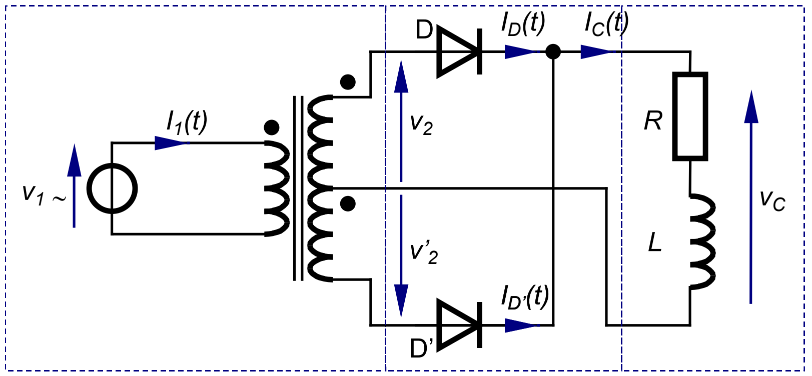

Figure 11 : modification de la source avec un transformateur à point milieu.

VI.2. Étude

Lorsque v_2 est positive, v'_2 est négative donc **D** conduit et **D′** est bloquée, si bien que $v_C = v_2$. Par un raisonnement similaire, lorsque v'_2 est positive, v_2 est négative donc **D′** conduit tandis que **D** est bloquée. La tension v_C obtenue à travers ce **redresseur double alternance** est toujours positive (fonction valeur absolue) et ne s'annule que pour π et 2π (*Figure 12*).

L'étude est complétée par la prise en compte des courants (idéalisés) sur cette même figure. Les courants dans les diodes n'existent que lorsqu'elles sont passantes. La détermination des courants primaires (amplitude et signe) passe par l'utilisation des lois relatives au transformateur (théorème d'Ampère en particulier) en considérant que le courant de magnétisation du transformateur est nul :

$$N_1 i_1 - N_2 i_D + N_2 i_{D'} = 0$$

Sur la première demi-période $i_D = I_0$ et $i_{D'} = 0$: $i_1 = mI_0$ ($m = \dfrac{N_2}{N_1}$, rapport de transformation).

Sur la seconde, c'est l'inverse, donc $i_1 = -mI_0$.

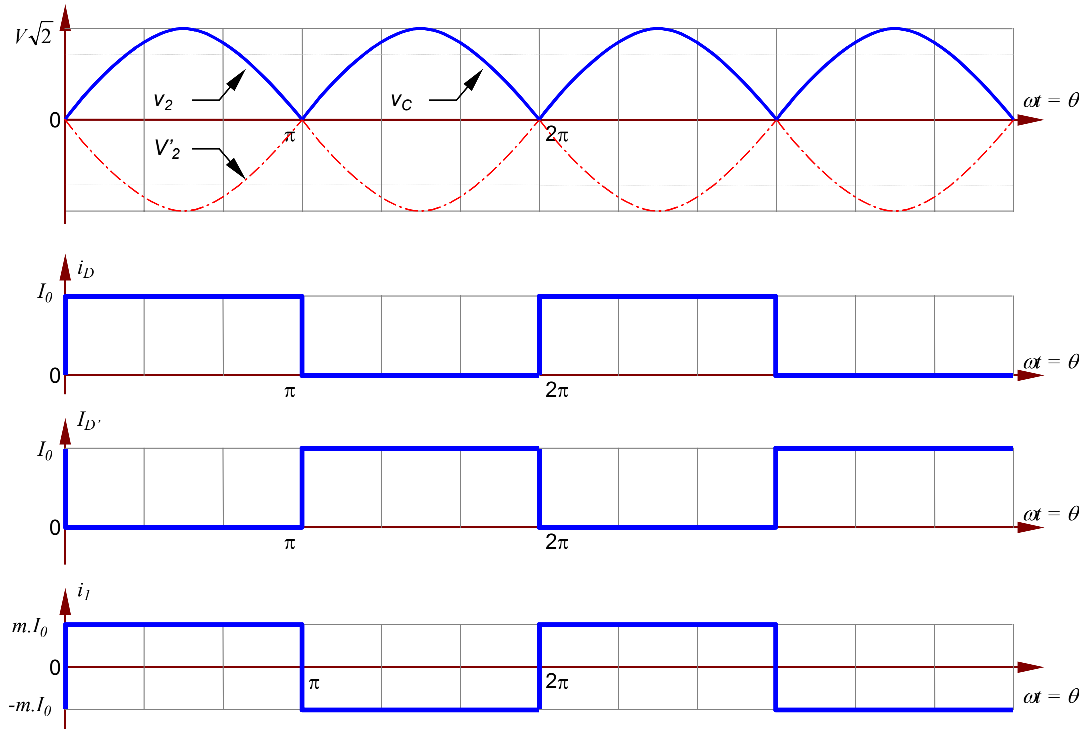

Figure 12 : chronogrammes des tensions et des courants avec transformateur à point milieu.

Tension moyenne

C'est le double de la valeur moyenne en double alternance : $V_0 = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi}$

Courant moyen dans une diode

Chaque diode conduit durant une demi-période, donc : $I_{D0} = \frac{1}{2} I_0$

Tension et courant efficaces au secondaire

Les valeurs efficaces des signaux redressés ou non sont les mêmes : $V_{2eff} = V$

Dans chaque enroulement secondaire, le courant n'existe que sur une demi-période : $I_{2eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$

Puissances au secondaire du transformateur

Puissance moyenne : $p(\theta) = VI_0\sqrt{2}\sin\theta$ sur chaque demi-période, donc $P_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI_0$

Puissance apparente pour les deux enroulements : $S_2 = 2V_{eff}I_{eff} = \frac{2VI_0}{\sqrt{2}}$.

Facteur de puissance au secondaire $k_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{2}{\pi} \approx 0{,}64$

Tension et courant efficaces au primaire

La tension efficace est celle d'une grandeur sinusoïdale : $V_{1eff} = \frac{V}{m}$

Le courant change alternativement de signe, son carré est constant : $I_{1eff} = mI_0$

Puissances au primaire du transformateur

Puissance moyenne : celle du secondaire $P_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI_0$

Puissance apparente : $S_1 = V_{eff}I_{eff} = VI_0$.

Facteur de puissance au primaire $k_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0{,}90$

Synthèse

	Charge	Commutateur (une diode)
Tension efficace	$V_0 = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi}$	Inverse : $V_{r\max} = -2V\sqrt{2}$
Courant efficace	I_0	$I_{D0} = \frac{1}{2} I_0$

	Primaire	Secondaire
Tension efficace	$V_{1eff} = \frac{V}{m}$	$V_{2eff} = V$
Courant efficace	$I_{1eff} = mI_0$	$I_{2eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$
Puissance active primaire ***P***	$P_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI_0$	$P_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI_0$
Puissance apparente primaire ***S***	$S_1 = V_{eff}I_{eff} = VI_0$	$S_2 = 2V_{eff}I_{eff} = \frac{2VI_0}{\sqrt{2}}$
Facteur de puissance ***k***	$k_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0{,}90$	$k_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{2}{\pi} \approx 0{,}64$

Conclusion

La comparaison des facteurs de puissance au secondaire (0,64) et au primaire (0,90) montre une amélioration assez claire dont le transformateur est la cause. En effet, à la différence du paragraphe §V, le courant primaire a maintenant une valeur moyenne nulle, ce qui tend à le rendre conforme aux exigences d'un réseau alternatif où la composante continue, dite homopolaire est nulle.

VII. Perspectives

Une fois mis en place ces différents principes, il est désormais possible d'envisager une étude classées des redresseurs monophasés non commandés. Cette étude n'est cependant pas réalisées. En effet, il est préférable de s'attacher maintenant à l'étude des convertisseurs commandés qui reprennent largement les principes évoqués ici.